

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2001-249235

(43)Date of publication of application : 14.09.2001

(51)Int.Cl. G02B 6/12
C23C 14/06
G02B 6/13
H01S 5/20
H01S 5/343

(21)Application number : 2000-059927

(71)Applicant : NIPPON TELEGR & TELEPH CORP
<NTT>

KAWAKAMI SHOJIRO

(22)Date of filing : 06.03.2000

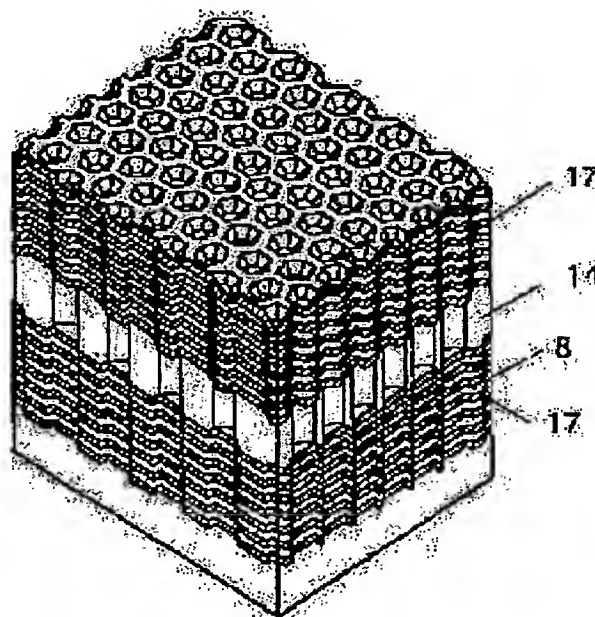
(72)Inventor : NOTOMI MASAYA
KURAMOCHI EIICHI
TAMAMURA TOSHIKI
TAKAHASHI CHIHARU
ARAYA AKIHIKO
KAWAKAMI SHOJIRO
KAWASHIMA TAKAYUKI

(54) PHOTONIC CRYSTAL STRUCTURE AND MANUFACTURING METHOD

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To solve a problem such that it is difficult to make a circuit only with a three-dimensional photonic crystal when constituting an optical circuit with a photonic crystal, and containment becomes insufficient with a two-dimensional photonic crystal.

SOLUTION: The problem is solved with a photonic crystal structure in which a first three-dimensional photonic crystal 17, a two-dimensional photonic crystal 14 and a second three-dimensional photonic crystal 17 are laminated, and with a manufacturing method for forming the three-dimensional photonic crystal by laminating alternately layers whose refractive index are different and for forming the two-dimensional photonic crystal by applying processing of a two-dimensional periodic structure with the lithography. The problem that it is difficult to make a circuit only with a three-dimensional photonic crystal when constituting an optical circuit with a photonic crystal, and containment becomes insufficient with a two-dimensional photonic crystal is solved because the three-dimensional photonic crystal is formed in the front and rear surfaces of the two-dimensional photonic crystal.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

24.04.2002

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

3449698

[Date of registration]

11.07.2003

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2001-249235

(P2001-249235A)

(43) 公開日 平成13年9月14日 (2001.9.14)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テ-マ-コ-ト* (参考)
G 0 2 B 6/12		C 2 3 C 14/06	P 2 H 0 4 7
C 2 3 C 14/06		H 0 1 S 5/20	4 K 0 2 9
G 0 2 B 6/13		5/343	5 F 0 7 3
H 0 1 S 5/20		G 0 2 B 6/12	Z
5/343			N
審査請求 未請求 請求項の数 9 O L (全 12 頁) 最終頁に続く			

(21) 出願番号 特願2000-59927(P2000-59927)

(22) 出願日 平成12年3月6日 (2000.3.6)

(71) 出願人 000004226

日本電信電話株式会社

東京都千代田区大手町二丁目3番1号

(71) 出願人 391006566

川上 彰二郎

宮城県仙台市若林区土樋236番地 愛宕橋

マンションファラオC-09

(72) 発明者 納富 雅也

東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日

本電信電話株式会社内

(74) 代理人 100082717

弁理士 雨宮 正季

最終頁に続く

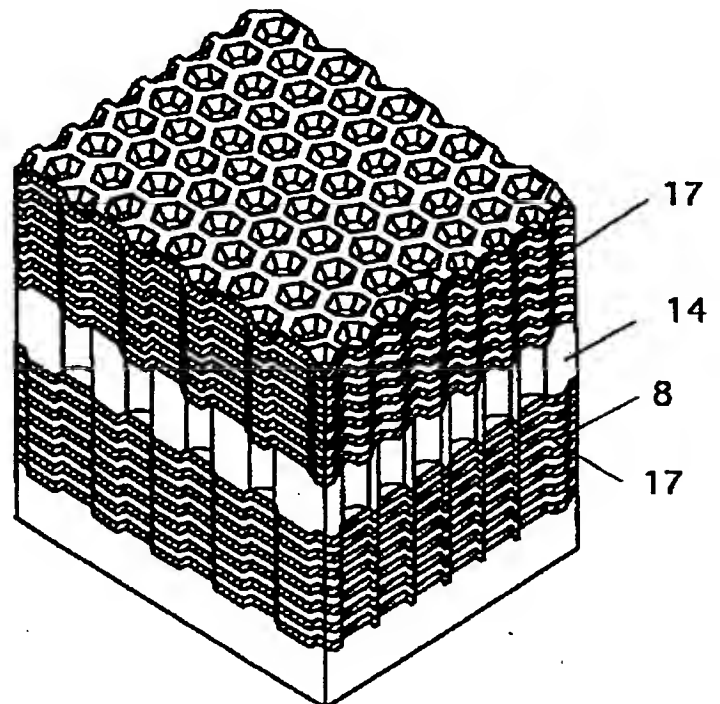
(54) 【発明の名称】 フォトニック結晶構造及び作製法

(57) 【要約】

【課題】 フォトニック結晶で光回路を構成する場合に3次元フォトニック結晶のみでは回路を作り込むことが困難であり、2次元フォトニック結晶では閉じ込めが不十分になるという問題点を解決する。

【解決手段】 第一の3次元フォトニック結晶17、2次元フォトニック結晶14、第二の3次元フォトニック結晶17を積層した構造を有することを特徴とするフォトニック結晶構造及び上記3次元フォトニック結晶を屈折率の異なる層を交互に積層することにより形成し、2次元フォトニック結晶をリソグラフィにより2次元の周期構造の加工を施して形成する作製法で解決できる。

【効果】 2次元フォトニック結晶の表裏面を3次元フォトニック結晶を形成したため、フォトニック結晶で光回路を構成する場合に3次元フォトニック結晶のみでは回路を作り込むことが困難であり、2次元フォトニック結晶では閉じ込めが不十分になるという問題点を解決することができる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 第一の3次元フォトニック結晶、2次元フォトニック結晶、第二の3次元フォトニック結晶を積層した構造を有することを特徴とするフォトニック結晶構造。

【請求項2】 前記2次元フォトニック結晶は周期的な周期孔を有することを特徴とする請求項1記載のフォトニック結晶構造。

【請求項3】 前記2次元フォトニック結晶は周期的な周期孔の欠陥による導波路を有することを特徴とする請求項2記載のフォトニック結晶構造。

【請求項4】 前記2次元フォトニック結晶は半導体井戸構造又は半導体ヘテロ構造を有することを特徴とする請求項1から3記載のいずれかのフォトニック結晶構造。

【請求項5】 前記3次元フォトニック結晶は積層方向に入出力用導波路を有することを特徴とする請求項1から4記載のいずれかのフォトニック結晶構造。

【請求項6】 2次元周期構造を形成した基板上に、2種類以上の屈折率の異なる材料を交互積層することにより形成した3次元フォトニック結晶構造を形成する工程、リソグラフィにより2次元の周期構造の加工を施して2次元フォトニック結晶構造を形成する工程、続いてこの2次元周期構造の上に2種類以上の屈折率の異なる材料を交互積層することにより形成した3次元フォトニック結晶構造を形成することを特徴とするフォトニック結晶構造の作製法。

【請求項7】 第一の基板上に、リソグラフィにより2次元の周期構造の加工を施して、表裏面に2次元周期構造を形成した2次元フォトニック結晶構造を形成する工程、この表面の2次元周期構造上に2種類以上の屈折率の異なる材料を交互積層することにより3次元フォトニック結晶構造形成する工程、この3次元フォトニック結晶構造上に、第二の基板を設ける工程、前記第一の基板を除去する工程、前記2次元フォトニック結晶構造の裏面の2次元周期構造に2種類以上の屈折率の異なる材料を交互積層することにより3次元フォトニック結晶構造形成する工程、を含むことを特徴とするフォトニック結晶構造の作製法。

【請求項8】 前記3次元フォトニック結晶をバイアスパッタにおける形状保存モード（自己クローニングモード）によって作製することを特徴とする請求項7又は8記載のフォトニック結晶構造の作製法。

【請求項9】 前記基板の2次元周期構造に点欠陥を設けておくことを特徴とする請求項6記載のフォトニック結晶構造の作製法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】 本発明はフォトニック結晶構造及び作製法、さらに詳細には光情報処理、光伝送等に用い

られるレーザ、光導波路、光集積回路等の様々な光デバイス等を構成する基本構造及びその作製法に関するものである。

【0002】

【従来技術】 誘電体周期構造中では光は周期的摂動を受け、周波数の分散関係が結晶中の電子のバンド構造と同様なバンド構造をとることが知られており、このような誘電体周期構造はフォトニック結晶と呼ばれている。フォトニック結晶中の光の伝搬はバンド構造によって決定されるため、結晶構造や周期的摂動の大きさを制御することにより、その光学的性質を自由に設計することが可能である。

【0003】 このようなフォトニック結晶の有用性ははじめ1987年にYablono vitchにより、3次元的にバンドギャップが開いたフォトニック結晶（フォトニックバンドギャップ材料）を用いて光を完全に閉じ込めることができるという指摘（E. Yablono vitch, Phys. Rev. Lett. 582059（1987））により注目されるようになった。

【0004】 3次元フォトニック結晶はサブミクロンの3次元周期構造であるため作製が簡単ではないが、今までにいくつかの方法が提案され作製の試みが行われている。

【0005】 代表的な2種類の3次元フォトニック結晶作製法を説明する。図15の構造は一定間隔で並んだロッド1を位相を半周期だけずらしながら90度回転して重ねていくことにより形成される積み木状の構造である。この構造はマイクロマシン技術を応用した方法（S-Y. Lin et al., Nature 394, 251（1998））やウエハ張り付けを繰り返す方法（S. Noda et al. IEEE J. Lightwave Technol. LT17, 1948（1999））によって作製が試みられているが、作製工程は複雑でかつ工程数が多く、各工程において正確な位置合わせが必要であるために、まだ十分な大きさの結晶は作られていない。

【0006】 これと異なる作製法として、はじめに図16（a）に示す2次元周期溝2を作製した基板3上に交互に誘電率の異なる層4、4'を積層することにより図16（b）に示す3次元周期構造を作製する、という方法がある。この方法自体はYablono vitchが1987年の前述の論文で指摘していたが、通常の積層条件を用いると表面5の平坦化が速やかに起こるために実際に作製される構造は図17のようになってしまい、3次元周期構造はこの方法では作製できない。

【0007】 しかし、その後バイアスパッタの特定のモードを用いることにより基板の凹凸を保存する形状保存モード（自己クローニングモード）が見つかり、これを用いた3次元周期構造の作製が報告された（S. Kawakami, Electronics Letter

s 33, 1260, 1997)。2次元周期構造6が形成された基板7(図18の(a))上に、この形状保存モードで交互多層膜8の積層を行うと図18の(b)に示すようにはじめの基板7の2次元周期構造6を保存した形状の交互多層膜8が形成される。この方法による3次元周期構造の形成プロセスを具体的に説明する。

【0008】まず、2次元周期穴構造をリソグラフィ及びドライエッチング加工により形成し、この2次元周期構造の上にSi/SiO₂の交互積層構造を自己クロージングモードにより積層することにより3次元周期構造が作製される。40層以上の積層においても表面平坦化が起こらず、形状保存が保たれていることが既に確認されている。

【0009】この方法は、先にあげた方法に比べて遥かに作製プロセスが単純であり、大きな膜厚の3次元フォトニック結晶を比較的容易に作製することができる、という特徴がある。しかし、この方法で作製される構造は積層方向には大きなギャップが開くが、全ての方向にバンドギャップを開かせることが困難であるという問題がある。

【0010】一方、2次元フォトニック結晶は、図19の(a)、(b)、(c)に示すようにリソグラフィによるマスクパターン9を用いて垂直性の良いドライエッチングで転写することにより作製可能であり、3次元フォトニック結晶に比べると作製は容易である。すなわちリソグラフィによるマスクパターン9を作製し(図19の(a))、垂直にエッチングして垂直穴10を形成する(図19の(b))とともに、マスクパターン9を除去して、図19の(c)の2次元フォトニック結晶を得る。なお図19(a)、(b)は結晶の側面図、図19(c)の上面図は側面図、下面図は平面図である。

【0011】以上のような方法で2次元及び3次元のフォトニック結晶を作製する試みが行われているが、フォトニック結晶をデバイス応用する場合には以上のような無欠陥の結晶構造だけでは機能を持たせることができない。機能を持たせてデバイス動作させるためには、フォトニック結晶中に構造欠陥を人為的に導入する必要がある。

【0012】バンドギャップが開いたフォトニック結晶中に線欠陥を作製するとその部分には光が伝播可能な導波路11が形成され(図20の(a))、点欠陥を作製するとその部分に光が閉じ込められて共振器12が形成される(図20の(b))。

【0013】このようにして形成される導波路11や共振器12では、欠陥部分を光が侵入を許されないフォトニック結晶が取り囲んでいることにより、光の閉じ込めが実現されており、通常の光導波路11や光共振器12に比べて著しく強い閉じ込めが実現できる。

【0014】図20の(c)に示すような2次元正方格子フォトニック結晶中の単一欠陥導波路11に波長オー

ダーの曲げ半径の直角曲げを設けた場合に、曲げ部13における散乱損失及び反射損失を殆どゼロにできることが数値計算により示されている(Mekis et al. Phys. Rev. Lett. 77, 3787 (1996))。このようなフォトニック結晶中の欠陥による導波路や共振器により光回路を構成した場合には、それぞれの大きさを波長オーダーにできるため、回路のサイズを著しく小型化することができる。

【0015】このような光回路の小型化を目指した場合、3次元フォトニック結晶は無欠陥の周期構造を作製すること自体が難しいため複雑な欠陥を含む回路構成を実現するのは技術的に非常に困難である。

【0016】一方、通常電子デバイスでも光デバイスでも集積回路は2次元面内で閉じていることが多いことから、回路構成自体は2次元フォトニック結晶で実現可能である。2次元フォトニック結晶は3次元フォトニック結晶に比べてかなり作製が容易であり、欠陥を導入するのもそれほど困難ではない。以上のような理由により、現状では多くの場合2次元フォトニック結晶を用いて導波路や共振器の研究が行われている。

【0017】Mekis等の数値計算では理想的な2次元系で計算を行っており、これは無限に長い2次元フォトニック結晶14の場合に相当する(図21)。しかし、現実的には2次元フォトニック結晶はドライエッチング等の加工技術で作製するために2次元面に垂直方向の長さはたかだか波長の数倍程度が上限であり、無限に長いフォトニック結晶とはみなすことができない。

【0018】そのような有限厚さのフォトニック結晶で有効に回路を作るためには上下の閉じ込め構造をどうするかが非常に重要である。実際にこれまで作製されてきた2次元フォトニック結晶では2次元フォトニック結晶14の上下を空気やSiO₂等の低屈折率材料15で挟んだスラブ型の構成をとっている場合が多い(図22)。なお、16は半導体基板である。

【0019】単純な直線導波路ではこのスラブ型の2次元フォトニック結晶中に損失の無い導波モードが存在するが、曲げ導波路の場合には最も放射損失が深刻な2次元面内への損失は防げるが2次元面から外れた斜方向に放射損失が生じてしまう。この問題は点欠陥で構成された共振器の場合も同じで、斜め上面への漏れが生じるために共振器としての性能が低下してしまう。

【0020】

【本発明が解決しようとする問題点】本発明は、フォトニック結晶で光回路を構成する場合に3次元フォトニック結晶のみでは回路を作り込むことが困難であり、2次元フォトニック結晶では閉じ込めが不十分になるという問題点を解決する。

【0021】

【課題を解決するための手段】上記問題点を解決するため、本発明によるフォトニック結晶構造は、第一の3次

元フォトニック結晶、2次元フォトニック結晶、第二の3次元フォトニック結晶を積層した構造を有することを特徴とする。

【0022】また、本発明によるフォトニック結晶構造の作製法は、2次元周期構造を形成した基板上に、2種類以上の屈折率の異なる材料を交互積層することにより形成した3次元フォトニック結晶構造を形成する工程、リソグラフィにより2次元の周期構造の加工を施して2次元フォトニック結晶構造を形成する工程、続いてこの2次元周期構造の上に2種類以上の屈折率の異なる材料を交互積層することにより形成した3次元フォトニック結晶構造を形成することを特徴とする。

【0023】さらに本発明による第二のフォトニック結晶構造の作製法は、第一の基板上に、リソグラフィにより2次元の周期構造の加工を施して、表裏面に2次元周期構造を形成した2次元フォトニック結晶構造を形成する工程、この表面の2次元周期構造上に2種類以上の屈折率の異なる材料を交互積層することにより3次元フォトニック結晶構造形成する工程、この3次元フォトニック結晶構造上に、第二の基板を設ける工程、前記第一の基板を除去する工程、前記2次元フォトニック結晶構造の裏面の2次元周期構造に2種類以上の屈折率の異なる材料を交互積層することにより3次元フォトニック結晶構造形成する工程、を含むことを特徴とする。

【0024】本発明では、図1に示すような2次元フォトニック結晶14を3次元フォトニック結晶17で挟み込んだ構造を作製する。この図で2次元フォトニック結晶14がコアとなり、3次元フォトニック結晶17は光を閉じ込めるためのクラッドとなる。この構造では光は基本的に2次元フォトニック結晶部に閉じ込められ、光回路は2次元フォトニック結晶部に作製する。従って欠陥等の複雑な構造は全て2次元フォトニック結晶部に作りこまれ、3次元フォトニック結晶部は単純な無欠陥周期構造をとる。3次元フォトニック結晶中に欠陥を作る必要がないため作製プロセスは比較的簡単になる。

【0025】また、回路は2次元面内に作製されるため、この2次元面内に最も大きなギャップが開いている必要があるが、この構成ではこの方向には2次元フォトニック結晶による大きなギャップが開いている。3次元フォトニック結晶はフルバンドギャップを持っていることが望ましいが、必ずしもそれが無ければ無いい。特に2次元面内方向には2次元フォトニック結晶によって放射が抑制されているので、3次元フォトニック結晶としてギャップが開いている必要はない。

【0026】また、曲げ導波路等で問題になる2次元面に対して斜め方向への放射損失に関しては、3次元フォトニック結晶が2次元面から外れた方向には大きなギャップを持っていることから、この放射損失を抑制することができる。

【0027】本発明では3次元フォトニック結晶部をバ

イアススパッタの自己クローニングモードにより作製し、2次元フォトニック結晶部をリソグラフィとエッチングにより作製する。

【0028】作製工程として実施例に示すように3次元フォトニック結晶、2次元フォトニック結晶、3次元フォトニック結晶の順番で作製する場合と2次元フォトニック結晶、3次元フォトニック結晶、3次元フォトニック結晶の順番で作製する場合が考えられるが、いずれの場合においても2次元フォトニック結晶上に3次元フォトニック結晶を作製する工程が最も技術的に難しい。

【0029】ところがここで用いるバイアススパッタの自己クローニングモードによる3次元フォトニック結晶作製法では、下地の2次元フォトニック結晶の周期を鑄型にして3次元フォトニック結晶が作製されるため工程が非常に単純化される。しかも、その過程で2次元フォトニック結晶の孔が埋まらずに3次元フォトニック結晶部が積層することが可能であり、また2次元フォトニック結晶部に導波路等の欠陥を作っても、上に作製される3次元フォトニック結晶は均一な無欠陥のフォトニック結晶になるという特徴がある。

【0030】

【実施例】以下、図面を用いて本発明のフォトニック結晶構造作製の実施例を説明する。

【0031】

【実施例1】図2から図6に第1の実施例における本発明のフォトニック結晶作製工程を示す。はじめの図2から図4までは従来報告されているのと同じバイアススパッタの自己クローニングモードによる3次元フォトニック結晶作製プロセスである。

【0032】まずSi基板18上に電子ビーム露光によりレジストパターンを作製し、これをマスクとしてドライエッチングを行いSi基板上に2次元周期構造6を作製する(図2)。

【0033】続いてこの溝構造の上にバイアススパッタによりSi層81とSiO₂層82の交互多層膜8を積層する。ここで自己クローニングモードを用いることによりはじめの2次元周期構造が積層過程で保存され、結果として図に示すような3次元周期構造が形成される(図3)。

【0034】3次元周期構造の上にSi層81を同じく自己クローニングモードで積む(図4)。このSi層81上に再び電子ビーム露光により2次元周期マスクパターンを形成する。このマスクの上からドライエッチングを施し、Si層81に周期孔19をあけ、この部分をエアーホール型2次元フォトニック結晶14とする(図5)。

【0035】次に、この2次元フォトニック結晶の上に再びバイアススパッタの自己クローニングによりSi/SiO₂交互多層膜8を積層する(図6)。この積層は基本的にはプロセスbにおける2次元周期溝上への3次

10

20

30

40

50

元フォトニック結晶積層と同じプロセスであり、図4と同じように2次元フォトニック結晶の上に3次元フォトニック結晶が形成される。

【0036】以上が作製工程の概要である。このような作製工程では2次元フォトニック結晶の上に3次元フォトニック結晶を積層する工程が最もポイントである。

【0037】まず、この工程において2次元フォトニック結晶の空気孔部（周期孔19）がSiまたはSiO₂によって埋まってしまうと、結果として2次元フォトニック結晶部の面内の屈折率変調が弱くなり、面内のギャップが狭くなり、場合によってギャップが消失してしまう。

【0038】しかしここで用いたバイアススパッタによる作製法では自己クローニングモードの条件を選ぶことにより、周期孔19にはSiおよびSiO₂が堆積せず、すみやかに3次元フォトニック結晶を形成することが可能である。

【0039】具体的には、膜に入射するスパッタ粒子の指向性が弱い自己クローニング条件を用いることで、穴の深部には粒子を入射させず、穴の縁に膜を堆積させることで、速やかに穴をふさぐことができ、かつ自己クローニングモードを継続させることが可能である。

【0040】また、2次元フォトニック結晶部には回路を実現するために線欠陥や点欠陥が作り込まれるが、この欠陥の上部に3次元フォトニック結晶が作製できないと閉じ込めはその分弱くなる。単純に考えると理想的な自己クローニングモードでは下地をなぞった積層が行われるから、欠陥を持った2次元フォトニック結晶の上には欠陥を持った3次元フォトニック結晶が積層されることになるが、実際には以下に説明する機構により欠陥を持った2次元フォトニック結晶の上に無欠陥の3次元フォトニック結晶を形成することが可能である。

【0041】図4で3次元フォトニック結晶上に自己クローニングモードで積層されるSi層81の最上面は、3次元フォトニック結晶部の上面（図3）と同じ2次元周期構造となっており、この上に交互多層膜8を自己クローニングモードで積層すれば、図3と同じ3次元フォトニック結晶が形成される。

【0042】一方、欠陥導波路を作製した場合は、図5の工程で2回目のリソグラフィを行う時に作り込むことになり、エッチング後に形成される構造の形状は図6の替わりに図7（a）のようになる。

【0043】この例では60度曲がりを持った欠陥導波路が形成されている。この図でわかるように欠陥導波路部分にはエッチングは施されないで図4と同じ凹凸が残っており、この上にも3次元フォトニック結晶が作製可能な状態になっている。

【0044】ここで、2回目の自己クローニング積層プロセスの初期段階においてバイアススパッタの条件を適当に選ぶことにより、孔の深さによらずすみやかに安定

形状が現れるので、結局2次元フォトニック結晶部に欠陥を設けた部分も設けなかった部分も上部には同じ3次元フォトニック結晶が形成されることになる（図7（b））。

【0045】この例では導波路部分にはエッチングが全く施されていない場合であったが、例えば欠陥部分のエッチング穴径を他の部分に比べて小さくすることによっても導波路は形成可能である。この場合についても、ここで述べたのと同じ機構によって欠陥を伴う2次元フォトニック結晶上に無欠陥の3次元フォトニック結晶を作製可能であることは自明である。

【0046】

【実施例2】実施例1において述べた機構で欠陥の上に無欠陥の3次元フォトニック結晶を作るためには、下層の3次元フォトニック結晶の面内周期構造とその上に作製する2次元フォトニック結晶のパターンがずれていてはいけない。

【0047】実施例1の方法でこのずれを防ぐには、図2のリソグラフィ工程と図5のリソグラフィ工程で十分な位置合わせ精度を確保しなければならない。この場合のような1回のみの位置合わせであれば、この位置合わせは現状の技術で不可能ではないが、作製工程を変えることにより以下のように位置合わせを不要にすることも可能である。

【0048】図8から図13に実施例2における作製工程を示す。この方法ではGaAs基板20上にInGaP層21及びGaAs層（またはGaAs/AlGaAs半導体量子井戸構造またはInGaAs/GaAs半導体量子井戸構造）22がエピタキシャル成長された構造上にリソグラフィによってマスクパターンを作製し、ドライエッチングによって最上部のGaAs層22に2次元フォトニック結晶14を作製する（図8）。

【0049】この上に実施例1と同じ方法でSi/SiO₂交互多層膜8を積層して3次元フォトニック結晶17を作製する（図9）。この基板の3次元フォトニック結晶17の面の上にもう一枚のSi基板18をウェハボンディングの技術を用いて張り付ける（図10）。この際に3次元フォトニック結晶の上面の凹凸が基板張り付けの際に問題になることも考えられるが、基板18上にポリマー等の柔らかい材料をコーティングしておくことにより問題なく張り付けが可能である。

【0050】続いて裏面のGaAs基板20をInGaPに対して選択性のあるエッチング液によって除去し（図11）、さらにInGaP層21を別の選択エッチング液によって除去することにより、3次元フォトニック結晶17上に2次元フォトニック結晶14がのった構造が形成される（図12）。この構造は実施例1における図5の構造と構造的には殆ど同じである（実際には下部の3次元フォトニック結晶の対称性が逆転している）。次に実施例1と同じようにこの上に自己クローニ

ング積層により 3 次元フォトニック結晶 17 を積層することにより図 6 と同じ構造が作製される (図 13)。

【0051】この方法ではリソグラフィははじめの一回だけであり、そのため位置合わせの必要がない。また、実施例 1 では 2 次元フォトニック結晶部となる層 (実施例 1 の場合では Si 層) もバイアススパッタで作製しなければならないという材料の制限があり、例えば GaAs 等の化合物半導体を使用することは不可能であったが、実施例 2 の方法では 2 次元フォトニック結晶部はバイアススパッタプロセスに先立って形成されるため、バイアススパッタとは関係なく自由に材料を選ぶことができる。

【0052】従って例えば GaAs 中に InGaAs/GaAs 歪量子井戸構造や GaAs/AlGaAs 超格子構造を持ったような 2 次元フォトニック結晶を使うことも可能であり、2 次元フォトニック結晶部に様々なアクティブな機能を持たせることができるという利点がある。

【0053】ただ、この方法では 2 次元フォトニック結晶がまずはじめに作られるために欠陥部には自己クロウニングの基点と凹凸が存在しない。そのために図 7

(a) と同様に欠陥を作製するとその上には 3 次元フォトニック結晶は形成されない。

【0054】しかし、欠陥として孔径の違いによる欠陥を用いれば、実施例 1 に述べたのと同じ理由でこの上に無欠陥の 3 次元フォトニック結晶が作製される。実際にはリソグラフィの段階で欠陥部に非常に小さい孔を描画しておけば、エッチングの際のローディング効果によって、孔径の小さい部分はエッチングが浅くしか進まないため形状は殆ど実施例 1 と同じ構造が作製される。

【0055】

【実施例 3】実施例 1 及び実施例 2 では、導波路を全て 2 次元フォトニック結晶内に設けたが、本発明の構成では 2 次元フォトニック結晶面に垂直方向に導波路を作製することも可能であり、2 次元面内の導波路とこれに垂直な導波路を結合することも可能である。このような 2 次元面に垂直方向の導波路は特に光の入出力部として有用である。

【0056】この構成を図 14 に示す。はじめに基板に 2 次元周期溝を形成する際に、点欠陥 23 を設けておく (図 14 (a))。この上に自己クロウニングによって多層膜を積層すると、この点欠陥部分には 3 次元周期構造ではなく 1 次元周期構造が形成されるため、この部分は垂直方向の導波路となる (図 14 (a))。

【0057】この後、実施例 1 の場合と同じようにこの上に欠陥導波路を持った 2 次元フォトニック結晶 14 を形成し、この 2 次元面内の欠陥導波路とはじめの点欠陥が重なるようにする (図 14 (b))。この上にさらに 3 次元フォトニック結晶 17 を作製すると (図 14 (c)) のように垂直方向の取り出し用導波路を持った

導波路構造が作製される。

【0058】以上の実施例 1、2、3 では、バイアススパッタにより作製する部分の材料として Si および SiO₂ を用いたが、この部分はバイアススパッタで成膜可能な材料であれば基本的に同じ効果が期待できることは明らかである。

【0059】また、実施例 2 において 2 次元フォトニック結晶部として、InGaP 層をエッチングストップ層として持つ GaAs 層及び量子井戸構造を用いたが、エッチングストップ層とエッチング加工可能な材料の組み合わせであれば、任意の材料で同様の効果が期待できる。

【0060】例えば InP 基板上に InGaAsP/InGaAs などの InP 系量子井戸構造及び InP または InGaAs エッチングストップ層の組み合わせでも同様の効果が期待できることは自明である。また、2 次元フォトニック結晶部をエアーホール正方格子構造としたが、これもピラー構造や三角格子構造でも効果は同じである。

【0061】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によるフォトニック結晶構造は、2 次元フォトニック結晶の表裏面を 3 次元フォトニック結晶を形成したため、フォトニック結晶で光回路を構成する場合に 3 次元フォトニック結晶のみでは回路を作り込むことが困難であり、2 次元フォトニック結晶では閉じ込めが不十分になるという問題を解決することができる。また、本発明によるフォトニック結晶構造の製造方法によれば、2 次元周期構造上に自己クロウニングによって、交互多層膜を有する 3 次元フォトニック結晶が得られるので、容易に前記フォトニック結晶構造を作製することができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】本発明で提案するフォトニック結晶構造を示す模式図。

【図 2】本発明の実施例 1 におけるフォトニック結晶構造作製工程を示す模式図であって、2 次元周期構造を有する基板の斜視図及び断面図。

【図 3】本発明の実施例 1 におけるフォトニック結晶構造作製工程を示す模式図であって、前記基板に交互多層膜を積層したときの斜視図及び断面図。

【図 4】本発明の実施例 1 におけるフォトニック結晶構造作製工程を示す模式図であって、2 次元フォトニック結晶を作製する斜視図及び断面図。

【図 5】本発明の実施例 1 におけるフォトニック結晶構造作製工程を示す模式図であって、2 次元フォトニック結晶を積層したときの斜視図及び断面図。

【図 6】本発明の実施例 1 におけるフォトニック結晶構造作製工程を示す模式図であって、前記 2 次元フォトニック結晶構造に 3 次元フォトニック構造を積層したときの斜視図及び断面図。

【図 7】本発明における線欠陥を伴ったフォトニック結晶構造作製工程を示す模式図。

【図 8】本発明の実施例 2 におけるフォトニック結晶構造作製工程を示す模式図であって、基板上に 2 次元フォトニック結晶を作製したときの斜視図及び断面図。

【図 9】本発明の実施例 2 におけるフォトニック結晶構造作製工程を示す模式図であって、2 次元フォトニック結晶上に 3 次元フォトニック結晶を作製したときの斜視図及び断面図。

【図 10】本発明の実施例 2 におけるフォトニック結晶構造作製工程を示す模式図であって、3 次元フォトニック結晶上に第二の基板を作製したときの斜視図及び断面図。

【図 11】本発明の実施例 2 におけるフォトニック結晶構造作製工程を示す模式図であって、第一の基板を除去したときの斜視図及び断面図。

【図 12】本発明の実施例 2 におけるフォトニック結晶構造作製工程を示す模式図であって、第一の基板を除去したときの斜視図及び断面図。

【図 13】本発明の実施例 2 におけるフォトニック結晶構造作製工程を示す模式図であって、2 次元フォトニック結晶の裏面に 3 次元フォトニック結晶を形成した時の斜視図及び断面図。

【図 14】本発明の実施例 3 における線欠陥及び点欠陥の導入による垂直方向光導波路と面内方向光導波路を持つフォトニック結晶構造作製工程を示す模式図。

【図 15】ロッド積み上げ型 3 次元フォトニック結晶の作製方法を示す模式図。

【図 16 a】リソグラフィとエッチングによって 2 次元周期溝が形成された基板を示す模式図。

【図 16 b】図 16 a の構造上に理想的な交互積層を行うことによって作製される 3 次元フォトニック結晶構造を示す模式図。

【図 17】通常の積層条件で積層を行った場合に実際に作製される構造を示す模式図。

【図 18】形状保存モード（自己クローニングモード）を用いて周期構造を有する基板上に交互積層を行う工程*

* と実際に形成される 3 次元周期構造を示す模式図。

【図 19】リソグラフィとドライエッチングによって半導体基板上に 2 次元フォトニック結晶を作製する方法を示す模式図。

【図 20】2 次元フォトニック結晶中に設けられた線欠陥による光導波路構造 (a) 及び点欠陥による光共振器 (b) 及び曲がり線欠陥による直角曲がり導波路 (c) を示す模式図。

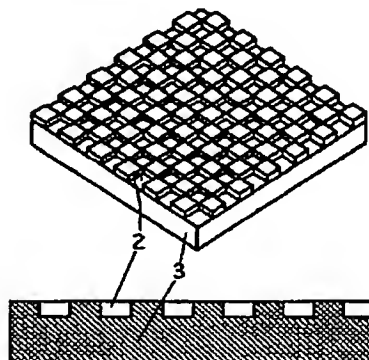
【図 21】理想的に長い 2 次元フォトニック結晶を示す模式図。

【図 22】スラブ型 2 次元フォトニック結晶の構造を示す模式図。

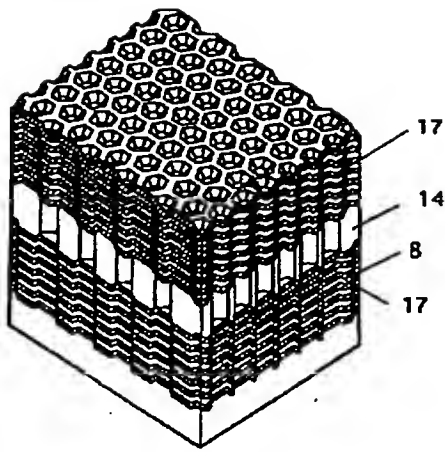
【符号の説明】

1	ロッド
2	2 次元周期溝
3	基板
4	誘電率の異なる層
4'	誘電率の異なる層
5	表面
6	2 次元周期構造
7	基板
8	交互多層膜
9	マスクパターン
10	垂直穴
11	導波路
12	点欠陥
13	曲げ部
14	2 次元フォトニック結晶
15	低屈折率材料
16	半導体基板
17	3 次元フォトニック結晶
18	Si 基板
19	周期孔
20	GaAs 基板
21	InGaP 層
22	GaAs 層
23	点欠陥

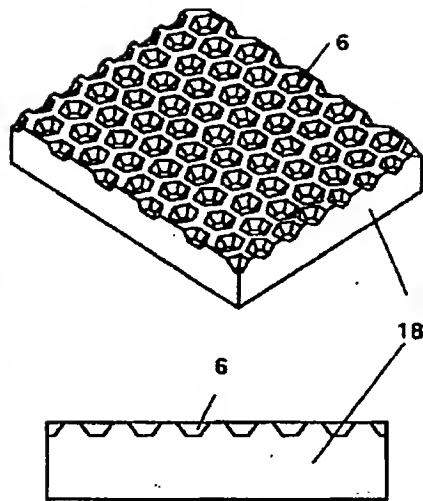
【図 16 a】



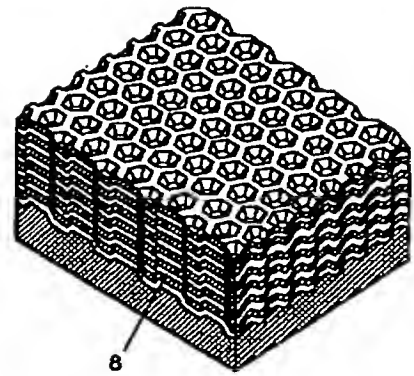
【図1】



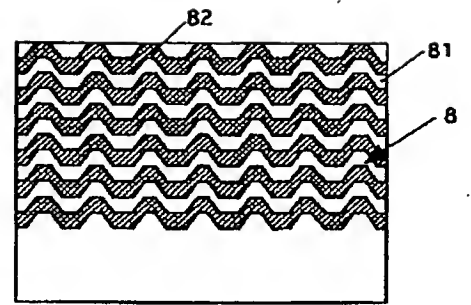
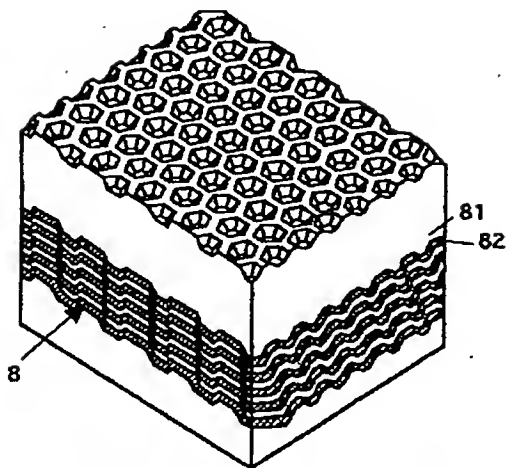
【図2】



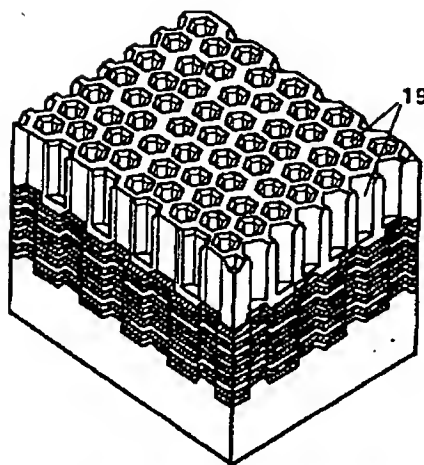
【図3】



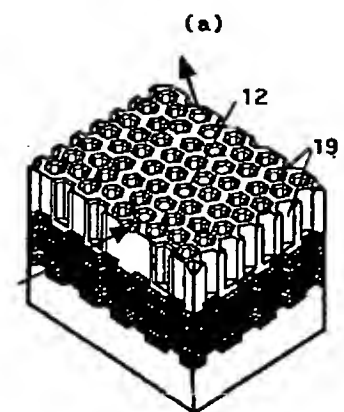
【図4】



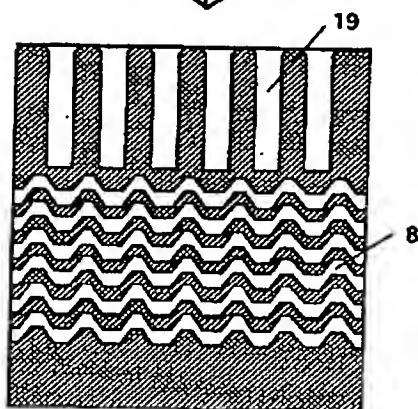
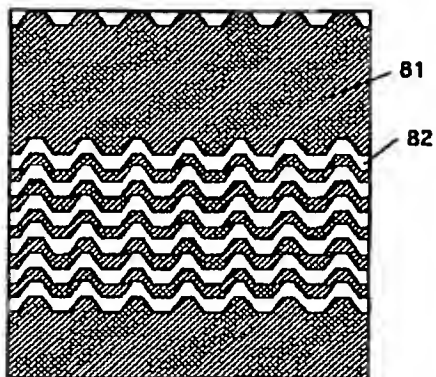
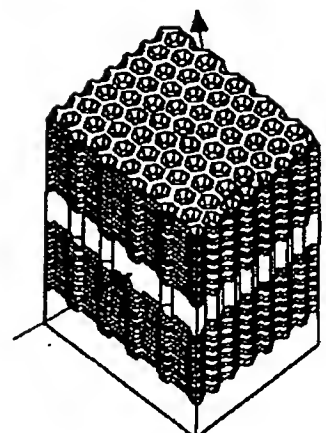
【図5】



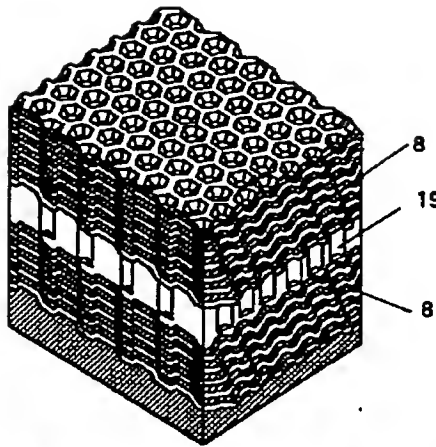
【図7】



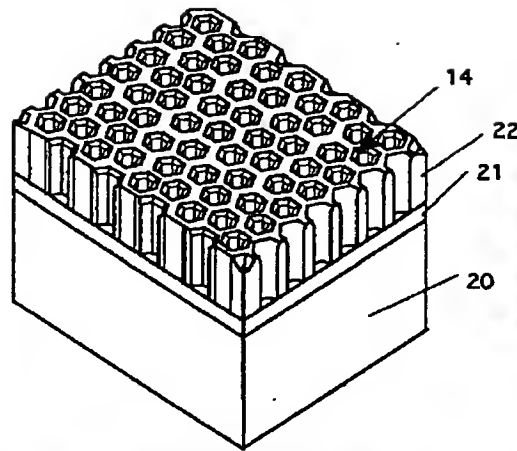
(b)



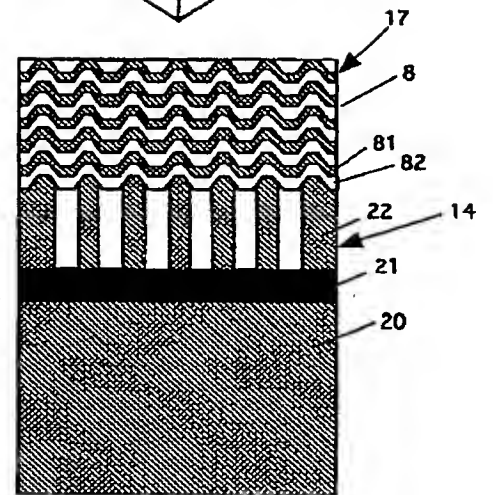
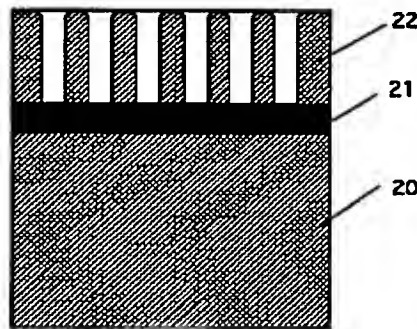
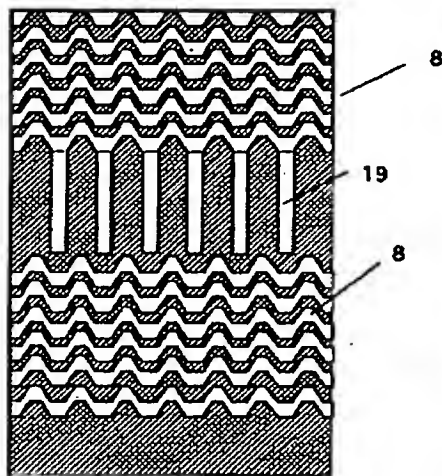
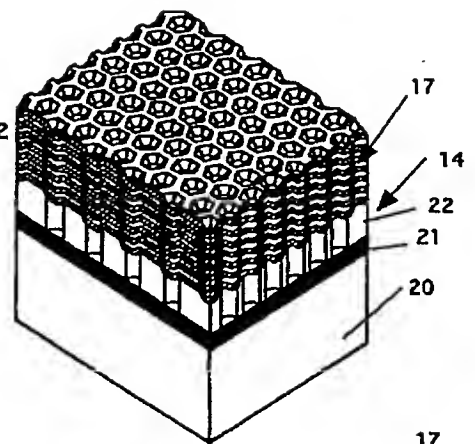
【図6】



【図8】

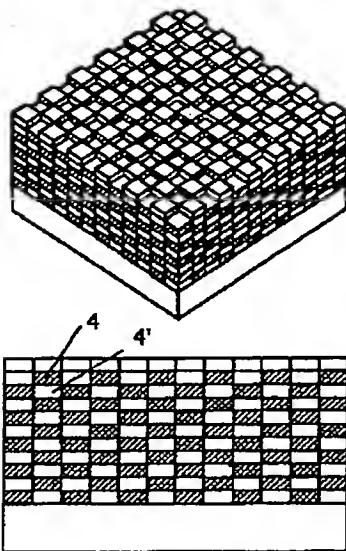


【図9】

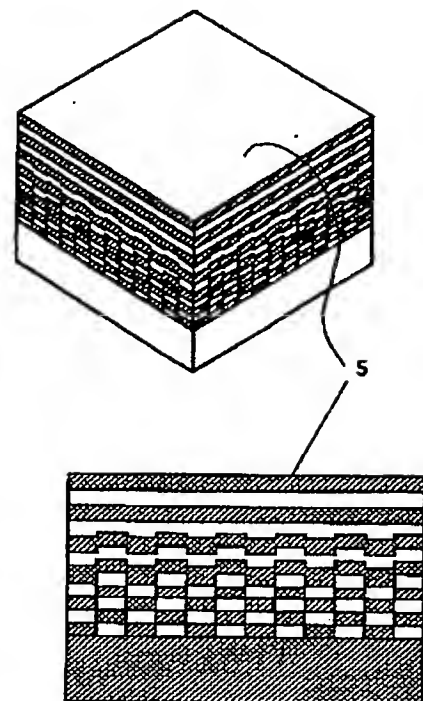
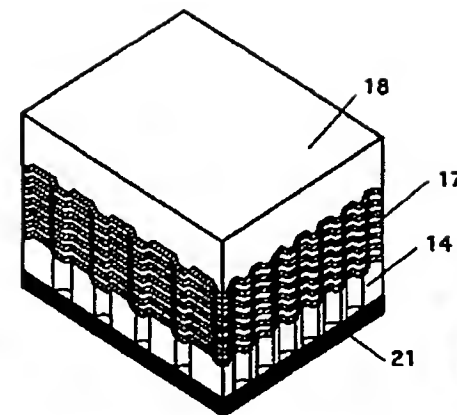


【図11】

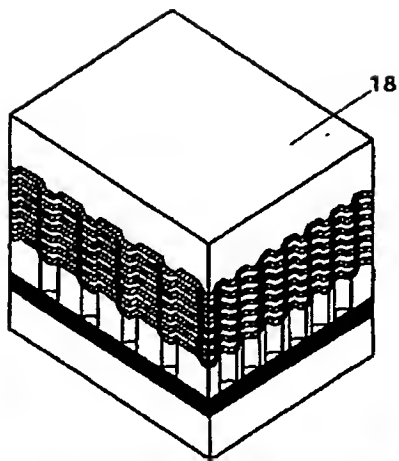
【図16b】



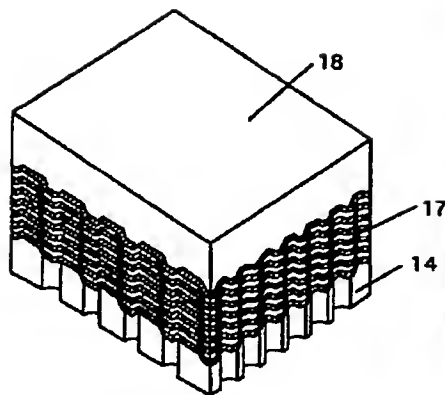
【図17】



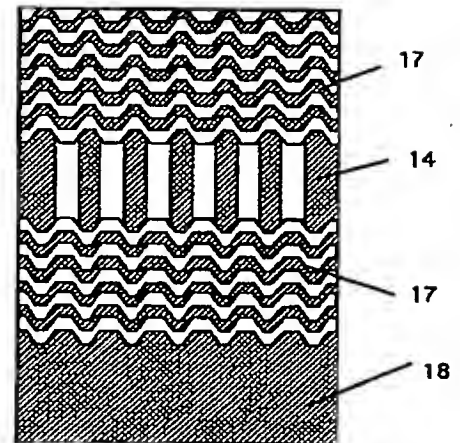
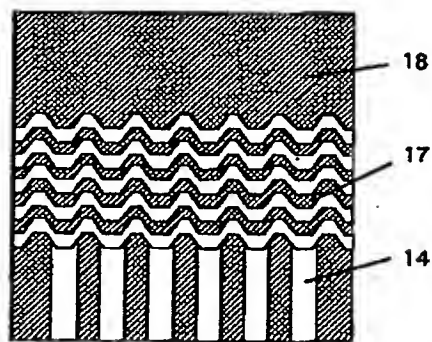
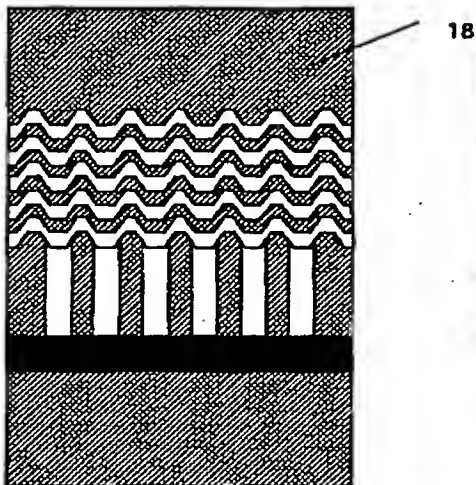
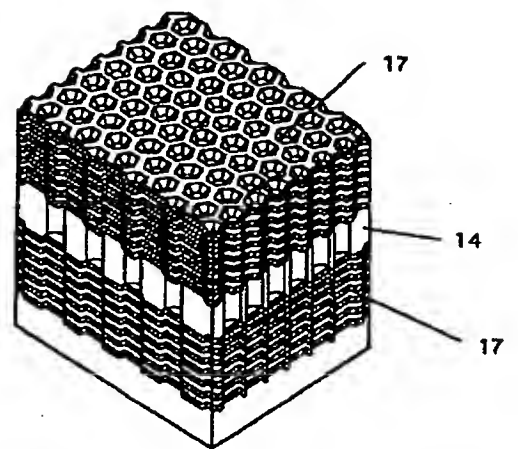
【図10】



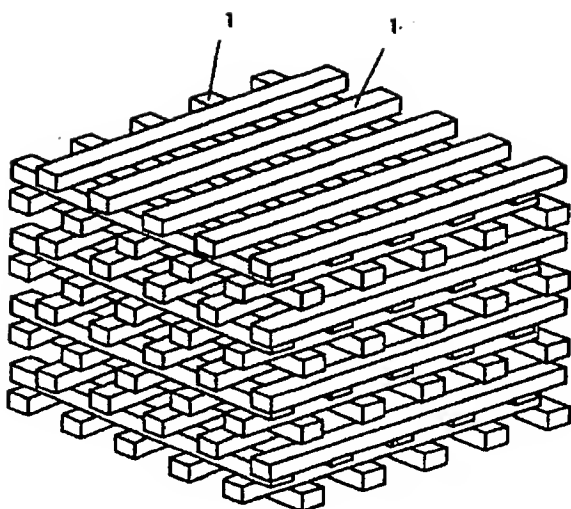
【図12】



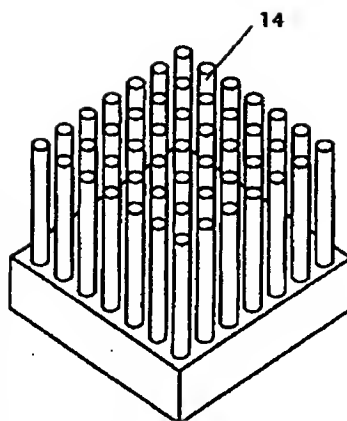
【図13】



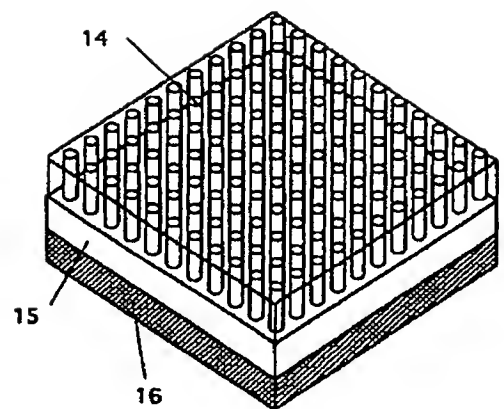
【図15】



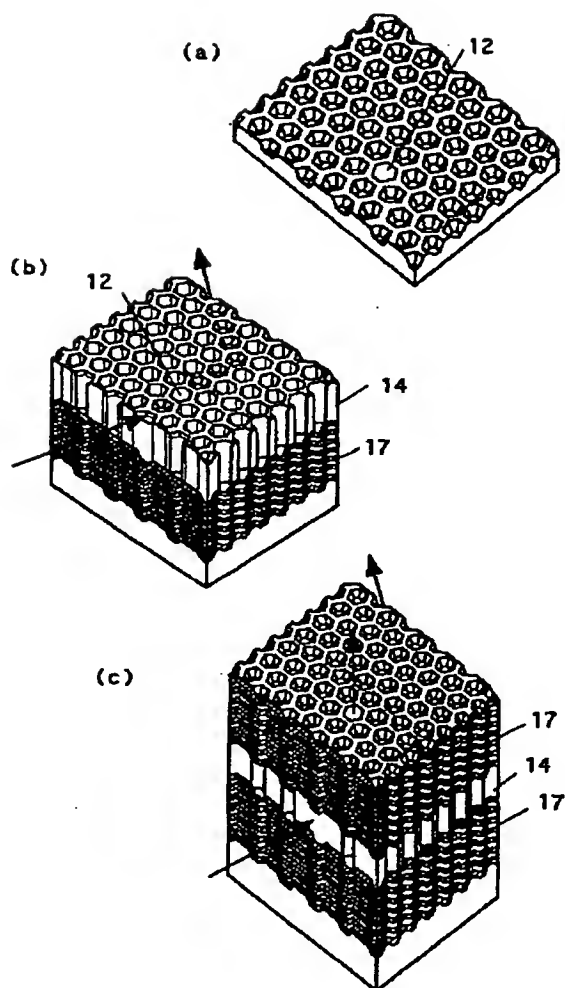
【図21】



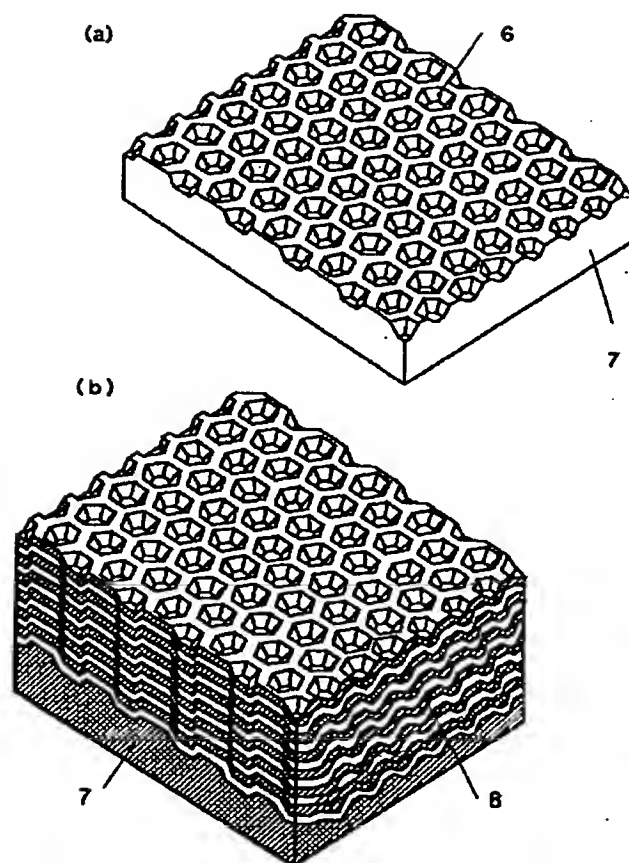
【図22】



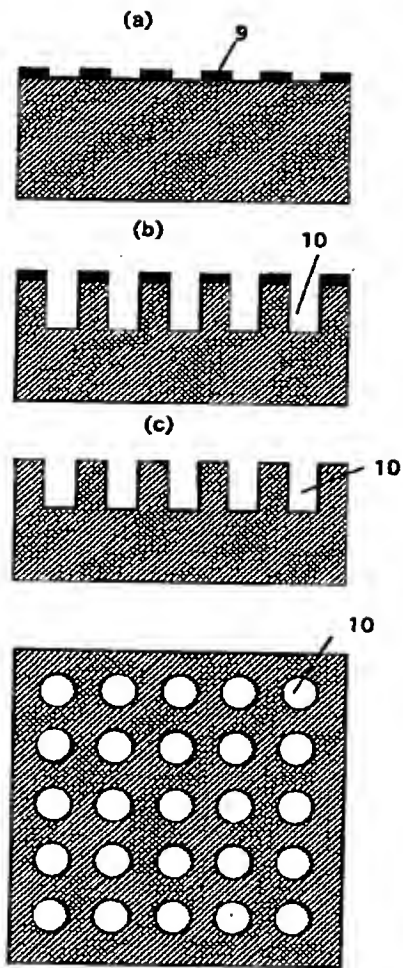
【図14】



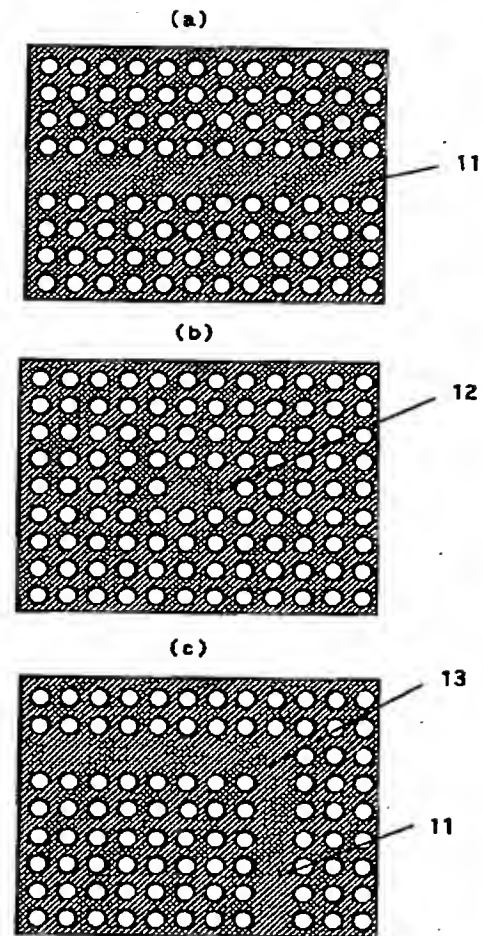
【図18】



【図19】



【図20】



フロントページの続き

(51) Int. Cl.⁷

識別記号

F I

G 0 2 B 6/12

テーマコード' (参考)

M

(72) 発明者 倉持 栄一
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日
本電信電話株式会社内

(72) 発明者 玉村 敏昭
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日
本電信電話株式会社内

(72) 発明者 高橋 千春
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日
本電信電話株式会社内

(72) 発明者 新家 昭彦
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日
本電信電話株式会社内

(72) 発明者 川上 彰二郎
宮城県仙台市若林区土樋236番地

(72) 発明者 川嶋 貴之
宮城県仙台市青葉区川内三十人町45番5号
ル・ヴィラージュ203号

F ターム (参考) 2H047 KA03 PA04 QA02 QA04
4K029 AA06 BA35 BA46 BB02 BC07
BD00 CA05
5F073 AA62 AA75 AB17 AB25 CA04
CA07 DA24 DA35